

XVI ERIAC
DECIMOSEXTO ENCUENTRO
REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ

17 al 21 de mayo de 2015



A1-21

Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas

PROPOSTA DE ESTIMATIVA DE CARREGAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS A PARTIR DAS VARIÁVEIS ELÉTRICAS QUANDO ALIMENTADOS POR REDES NÃO IDEAIS

A. F. BONELLI
Arteche
Brasil

A. R. AOKI
Lactec
Brasil

P. D. DONOLO
UNRC
Argentina

G. R. BOSSIO
UNRC
Argentina

G. O. GARCÍA
UNRC
Argentina

M. L. BONELLI
Arteche
Brasil

R. A. NEHLS
Copel
Brasil

Resumo – *Atualmente, a preocupação com a eficiência energética de processos está cada vez mais em pauta. Distante disto, têm-se as indústrias como maiores consumidores de energia elétrica, onde, via de regra, estas contêm um grande consumo de energia através de motores elétricos de indução. Assim, um bom trabalho de eficiência energética nestes motores se mostra de grande valia. Ressalta-se que há diversos estudos na literatura em que se analisam os impactos da Qualidade da Energia Elétrica em motores, entretanto, estes são normalmente focados em simulações computacionais ou ensaios laboratoriais. Dentro desta perspectiva, foram realizadas medições em 916 motores de indústrias de todo estado do Paraná, tendo por meta a realização de um levantamento da real situação das redes em que tais motores estão conectados, bem como o seu impacto. Para que esta ação fosse possível, foi necessário desenvolver uma metodologia de estimativa de carregamento e rendimento de motores que fosse de prática aplicação e considerasse redes com desequilíbrio e distorção de tensão. Assim, este artigo vem apresentar a referida metodologia.*

Palavras clave: Eficiência energética – Estimativa de carregamento e rendimento – Motor de indução trifásico – Qualidade de energia elétrica

1 INTRODUÇÃO

Desde a década de oitenta, quando o Ministério de Minas e Energia do Brasil criou o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), é crescente a preocupação com utilização “responsável” da energia elétrica. No entanto, apenas a partir do ano de 2001, quando houve o evento da racionalização da energia no país, o programa ganhou maior destaque.

Dentro deste cenário, destaca-se que mesmo com um maior número de consumidores residenciais, as indústrias ainda são as maiores responsáveis pelo consumo da energia elétrica gerada no Brasil [1]. Vale destacar também que mesmo as indústrias possuindo características muito distintas, o grande consumo resultante da utilização de motores elétricos é quase que uma regra. Em [2], é relatado que 50% do consumo de energia elétrica deste setor é advindo de motores elétricos. A mesma aponta também que 78% das vendas de motores para as indústrias brasileiras são constituídas por Motores de Indução Trifásicos (MITs). Assim, têm-se a ressalva, de que um bom trabalho de eficiência energética nos MITs é de grande valia.

Não obstante a esta constatação, vale destacar que há uma grande quantidade de estudos analisando os efeitos da Qualidade da Energia Elétrica (QEE) nos MITs [3] a [11]. Todavia, praticamente todos estes são

focados em motores via simulações computacionais ou ensaios laboratoriais, evidenciando que não há um conhecimento mais amplo de como é a realidade das redes elétricas industriais onde os motores estão conectados, ou seja, quais os distúrbios de QEE realmente estão aplicados aos MITs e quais suas intensidades.

Diante desta realidade, o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) conduziu um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) financiado pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL) onde o foco principal foi a melhoria da eficiência energética em MITs quando estes são alimentados por redes não ideais.

A princípio, para suprir a deficiência do conhecimento da real condição em que os motores se encontram, foi realizada uma extensa campanha de medição em diversas indústrias atendidas pela COPEL. Nesta campanha, foram monitorados 916 motores de 12 indústrias distribuídas em todo o estado do Paraná. Tais medições ocorreram no período de abril a novembro de 2011. Maiores informações da mesma está disponível em [12].

No entanto, para que se tenha a real avaliação de quanto os problemas de QEE estão afetando os motores monitorados é necessário que se saiba o carregamento e o rendimento dos MITs medidos. Por sua vez, para se obter estas variáveis é necessário o conhecimento da potência elétrica de entrada e da potência mecânica de saída. A potência elétrica é facilmente verificada através de um analisador de qualidade de energia elétrica. No entanto, para a potência mecânica, é necessária a mensuração do conjugado e da velocidade no eixo dos motores, ação essa impossível de se realizar em um ambiente industrial, principalmente abordando uma grande quantidade de motores.

Diante deste panorama, foi feito uma busca na bibliográfica das formulações de estimativa de rendimento e de carregamento de MITs. Verificou-se que praticamente todas as metodologias de estimativa tinham com premissa que a rede de alimentação fosse ideal, ou seja, livre dos problemas de Qualidade de Energia Elétrica. Assim, foi desenvolvida uma metodologia simples e que levasse em conta os distúrbios de QEE. Desta forma, este artigo vem apresentar a referida metodologia.

2 MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE CARREGAMENTO

O carregamento de um MIT (γ) pode ser definido por:

$$\gamma = \frac{P_m}{P_{m_n}} = \frac{P_a \cdot \eta}{P_{m_n}} \quad (1)$$

Onde: P_m - potência mecânica do MIT em kW;

P_{m_n} - potência mecânica nominal do MIT em kW;

P_a - potência ativa trifásica do MIT em kW;

η - rendimento do MIT.

Destas variáveis, a potência mecânica nominal é um dado de placa do motor e a potência ativa é adquirida com medições elétricas, faltando apenas o rendimento do motor. Assim, de posse do rendimento do motor é possível achar o seu carregamento. Com esta constatação, foi realizada uma pesquisa na literatura das metodologias de estimativa de carregamento e de rendimentos de MITs.

Com esta pesquisa, verificou-se que, atualmente há vários métodos utilizados para se estimar o carregamento e/ou rendimento de MITs, no entanto, poucos consideram redes de alimentação não ideal [13-16]. De acordo com [11]. Estes métodos poder ser agrupados em:

- Métodos de estimativa através de dados de placa;
- Métodos de escorregamento;
- Métodos de corrente;
- Métodos de circuitos equivalentes;
- Métodos de segregação das perdas;
- Métodos de torque.

Dentro de cada grupo dos métodos acima existem uma ou mais variantes, no entanto, todos os métodos possuem uma ou mais das seguintes desvantagens:

- Necessidade de se mensurar o conjugado e/ou velocidade. Pontos impraticáveis em campo, principalmente no que se refere ao conjugado;
- Necessidade de se estimar diversas variáveis, com: conjugado, velocidade mecânica e parâmetros do circuito equivalente das máquinas elétricas;
- Necessidade de realização de ensaios como de rotor bloqueado e a vazio, ensaios estes também impraticáveis em processos industriais;
- Consideração de redes ideais, ou seja, sem problemas de QEE.

Recentemente, foi apresentado um trabalho [17] o qual possui avanços em relação aos métodos apresentados até o memento. Este método tem a vantagem de não necessitar medições de conjugado e velocidade mecânica e não necessitar de ensaios especiais. Além do mais o mesmo considera os efeitos de desequilíbrio de tensão. No entanto, o presente método possui duas desvantagens, não considera as distorções harmônicas de tensão e necessita estimar dados do circuito equivalente do MIT e sua velocidade. Estas estimativas se fazem por meio de métodos de inteligência artificial, como algoritmos evolutivos, o que o torna não prático.
Diante das exposições supraditas, são apresentados os métodos que serão comparados com o método proposto. Todos estes métodos são considerados de aplicação simples, como o proposto, possibilitando a aplicação em um grande número de motores em campo, finalidade do P&D que o utilizou.

2.1 Método da potência de entrada

Para aplicação deste método é necessário apenas os dados de placa do motor e a mensuração da potência ativa trifásica na sua entrada. Este método é aplicado de acordo com a Equação (2).

$$\gamma = \frac{P_a . \eta_n}{P_{m_n}} 100\% \tag{2}$$

Onde: η_n – rendimento nominal.

2.2 Método da corrente

Por sua vez, este método utiliza os dados de placa do motor e as correntes e tensões medidas nos seus terminais. Este é dado pela Equação (3).

$$\gamma = \frac{I}{I_n} . \frac{V}{V_n} 100\% \tag{3}$$

Onde: I – corrente RMS medida em A (média trifásica);
I_n – corrente nominal em A;
V – Tensão RMS fase-fase em V (média trifásica);
V_n – Tensão nominal fase-fase em V.

2.3 Método do escorregamento

Mesmo para a aplicação do método do escorregamento sendo necessária a medição da variável mecânica velocidade, o mesmo será considerado com fins comparativos, pois utiliza apenas os dados de placa e a medição de velocidade no eixo. Assim, com uma parada do motor é possível colocar uma fita refletora em

seu eixo e utilizar um tacômetro ótico. Como não é necessário mensurar qualquer variável elétrica, o método do escorregamento também se torna de aplicação simples. O mesmo é apresentado pela Equação (4).

$$\gamma = \frac{s}{N_S - N_n} 100\% \tag{4}$$

Onde: s – escorregamento: velocidade síncrona em RPM (N_S) – velocidade medida em RPM;

N_S – velocidade síncrona em RPM;

N_n – velocidade nominal de placa.

3 MÉTODO PROPOSTO

O presente método vem sanar todas as dificuldades de se fazer estimativa de carregamento de motores em campo considerando os fenômenos de desequilíbrio de tensão e distorção harmônica de tensão. Ademais sua metodologia é simples, pois é necessário apenas medições de variáveis elétricas através de um medidor de QEE e dos dados de placa do motor. Os dados adquiridos são inseridos em uma única fórmula, podendo ser aplicado diretamente em uma planilha eletrônica de dados como o Excel.

Voltando para o método, este tem como princípio o cálculo da potência elétrica extraída do motor que realmente produza trabalho útil no eixo do mesmo. Assim, tal equacionamento sofreu consideráveis modificações em relação ao cálculo comum de potência trifásica, para que, desta forma, fossem considerados os efeitos de desequilíbrio e distorção de tensão.

A primeira adequação foi a utilização apenas da tensão e corrente fundamental, descartando-se as ordens harmônicas. Esta ação se obteve pelo fato dos torques gerados pelas componentes harmônicas serem ou oscilatórios ou de mínimas amplitudes, assim, toda potência elétrica fruto das ordens harmônicas pode ser considerada perdas do motor [5], [8] e [18].

A segunda alteração está relacionada ao desequilíbrio de tensão aplicado ao motor. Como é de conhecimento, os torques advindos das correntes de sequência positivas são a favor da rotação desejada, já os gerados pelas correntes de sequência negativa apresentam um torque girante de direção oposta [5] e [19].

Com estas premissas, se obteve a Equação (5), a qual apresenta a metodologia proposta para aquisição da potência que realmente produza trabalho no eixo do motor.

$$\gamma = \frac{P_{a_{util}}}{P_{m_n}} \times 100\% = \frac{\left(\sqrt{3}\left((V_+ \,.\, I_+) - (V_- \,.\, I_-)\right).FP_{3\emptyset}\right).\eta}{1000\,.P_{m_n}} \times 100\% \tag{5}$$

Onde: $P_{a_{util}}$ – potência ativa extraída do MIT que produza trabalho útil no eixo em kW;

V_+ e V_- componentes de sequência positiva e negativa da tensão em V;

I_+ e I_- componentes de sequência positiva e negativa da corrente em A;

$FP_{3\emptyset}$ – fator de potência trifásico.

4 VALIDAÇÃO E COMPARAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Para validação da metodologia proposta, foram realizadas medições em laboratório em dois MITs de 5,5 kW, 380 V, 50 Hz, sendo um de classe de eficiência standard (IE1) e outro de alta eficiência (IE3). Os dados de placa dos mesmos se encontram na TABELA I.

TABELA I. DADOS DE PLACA DOS MOTORES UTILIZADOS NOS ENSAIOS LABORATORIAIS

Dados de placa	Motor IE1	Motor IE3
P_{m_n} (potência mecânica nominal em kW)	5,5	5,5
V_n (tensão nominal fase-fase em V)	380	380
Frequência em Hz	50	50
η_n (rendimento nominal)	0,855	0,907
$\eta_{75\%}$ (rendimento para 75% de carregamento)	0,85	0,907
$\eta_{50\%}$ (rendimento para 50% de carregamento)	0,85	0,9
$FP_{3\emptyset}$ (fator de potência trifásico)	0,84	0,85
N_n (velocidade nominal em RPM)	1450	1465
I_n (corrente nominal em A)	11,635	10,839

Em laboratório foram mensuradas a potência mecânica (conjugado e velocidade) e a potência elétrica trifásica ativa. Assim, como um ambiente controlado, utilizando-se carga e fonte programável, podem-se aplicar fenômenos de QEE na alimentação dos MITs e controlar seus carregamentos.
Foram realizados oito ensaios em cada tipo de motor, os quais tiveram as seguintes variações:

- Motor com carregamento de 50 e 100%;
- Motor alimentado por rede sem distorção harmônica e sem desequilíbrio de tensão;
- Motor alimentado por uma rede com 5% de desequilíbrio de tensão;
- Motor alimentado por uma rede com 13% de distorção harmônica total de tensão;
- Motor alimentado por uma rede com 5% de desequilíbrio de tensão e com 13% de distorção harmônica total de tensão.

A Fig. 1 apresenta o arranjo laboratorial pra testes do motor.

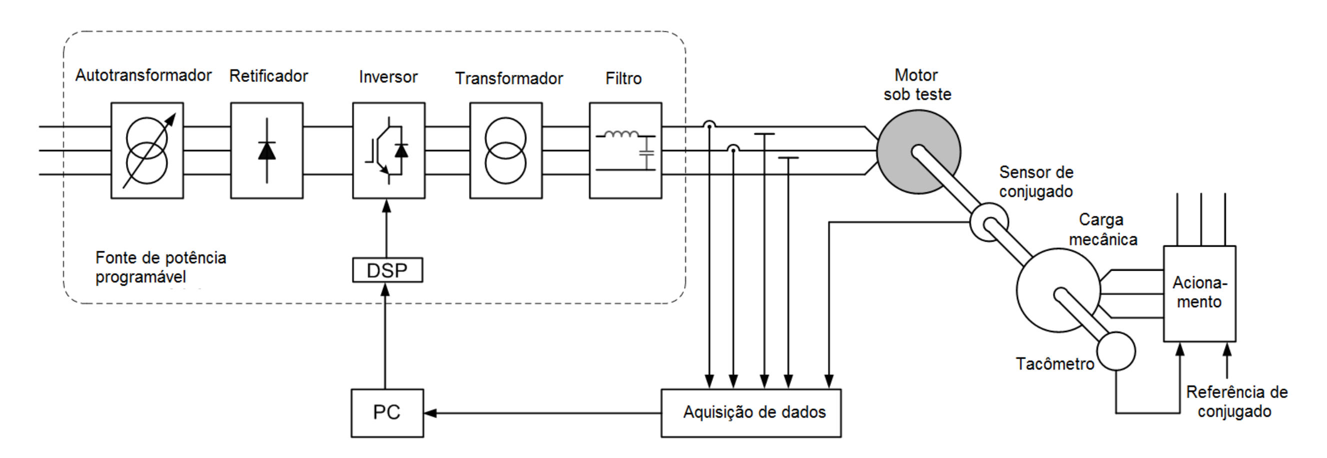


Fig. 1. Arranjo laboratorial de testes dos motores

A Fig. 1 também apresenta o motor testado, o qual se encontra conectado a uma carga controlável. Esta carga faz aquisição de conjugado e velocidade e ajusta ao valor desejado. Um sensor Staiger Mohilo (0-100 Nm) é usado para medir as variáveis mecânicas. São mensuradas duas tensões de linha e duas correntes do motor através de um medidor Yokogawa (3.2s, 40kS). As tensões e correntes obtidas são enviadas a um computador.
Voltando-se aos resultados dos ensaios, a Tabela II apresenta os erros dos carregamentos de cada método pra cada ensaio.

TABELA II. ERROS DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE CARREGAMENTO

Ensaio	Motor	Carregamento	Desequilíbrio	Distorção Harmônica	Erro do Método			
					Potência	Corrente	Escorregamento	Proposto
01	IE1	50	0	0	10,45%	24,61%	32,00%	9,52%
02	IE1	50	5	0	13,17%	34,74%	32,00%	10,72%
03	IE1	50	0	13	10,65%	30,02%	28,00%	11,17%
04	IE1	50	5	13	14,41%	39,33%	28,00%	12,47%
05	IE1	100	0	0	1,60%	5,86%	22,00%	1,57%
06	IE1	100	5	0	0,33%	2,35%	18,00%	1,71%
07	IE1	100	0	13	0,73%	3,07%	18,00%	0,72%
08	IE1	100	5	13	1,05%	0,04%	16,00%	0,87%
09	IE3	50	0	0	10,36%	25,45%	20,00%	10,25%
10	IE3	50	5	0	16,36%	38,97%	20,00%	13,68%
11	IE3	50	0	13	11,21%	33,46%	20,00%	11,59%
12	IE3	50	5	13	17,42%	45,03%	20,00%	15,45%
13	IE3	100	0	0	0,44%	4,07%	20,00%	0,48%
14	IE3	100	5	0	2,87%	1,66%	17,14%	0,92%
15	IE3	100	0	13	0,79%	0,03%	14,29%	0,72%
16	IE3	100	5	13	3,35%	4,67%	14,29%	1,15%
Média aritmética dos erros					**7,20%**	**18,34%**	**21,23%**	**6,44%**
Percentual de erro em relação ao método proposto					**11,85%**	**184,84%**	**229,86%**	**0,00%**

Com intuito de facilitar a visualização e comparação dos resultados, a Fig.02 apresenta os resultados de todos os ensaios em um gráfico.

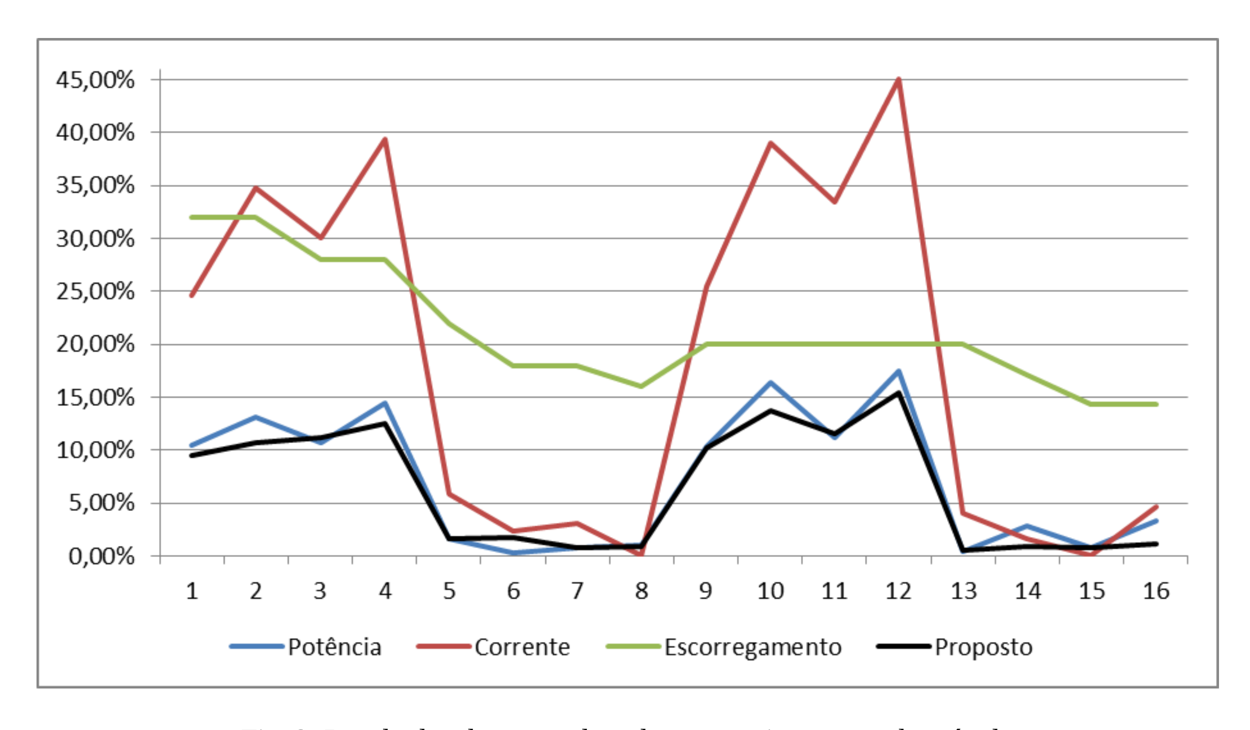


Fig. 2. Resultados dos erros de todos os ensaios para cada método

Mediante os resultados apresentados, ficam evidenciados que todos os métodos possuem grandes erros para baixas cargas e, exceto o método do escorregamento, todos os outros possuem bons resultados para carregamentos próximos de 100%.
Analisando comparativamente os métodos, pode-se concluir que:

- O método do escorregamento possui um erro praticamente constante e acima de 20%;
- O método da corrente possui os maiores erros, os quais se pronunciam para baixas cargas, no entanto, o mesmo apresenta bons resultados para altos carregamentos;
- Os métodos da potência e o proposto são os que apresentam os melhores resultados, no entanto, os mesmos possuem erros consideráveis para baixas cargas;
- Os resultados para o motor IE1 são próximos do resultado para o motor IE3

Voltando-se a comparação dos erros médios, destaca-se que o percentual de erros dos métodos de escorregamento e corrente são extremamente altos. Assim, os erros destes métodos em relação ao proposto foram, respectivamente, 229,86% e 184,84%. Por sua vez, o método da potência teve média de erro 11,85% superior ao proposto. Finalizando, verifica-se que o método proposto possui erros próximos de 1% quando os MITs estão com carregamento de 100%. Este fato ocorre independentemente dos distúrbios de QEE presentes na rede de alimentação do motor.

5 CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou um método simples de estimativa de carregamento de MITs utilizando apenas dados de placa e medição das variáveis elétricas dos motores. A partir deste dados, também se obtém o rendimento dos mesmos.
Além da simplicidade de aplicação, o referido método tem a vantagem de considerar os efeitos de desequilíbrio e distorção harmônica de tensão.
O desenvolvimento deste método foi motivado por um P&D onde se necessitou mensurar e analisar uma grande quantidade de motores em ambiente industrial. Como todos os métodos disponíveis não consideravam os distúrbios de QEE e boa parte deles era de difícil aplicação recorreu-se a busca de um método alternativo.
Para validação do referido método, foram realizados ensaios laboratoriais para comprovar a sua eficácia. Assim, o mesmo foi comparado com outros três métodos de estimativa de carregamento, quais sejam o método da potência, o da corrente e o de escorregamento.
Para todos os métodos houve erros consideráveis quando o motor possui baixa carga, e bons resultados para carregamentos próximos de 100%, exceto para o método do escorregamento que continuou com erros altos.
Comparando a média dos erros, os métodos da corrente e do escorregamento apresentaram erros com valores superiores a 180% do erro do método proposto. Em relação ao método da potência, a média de erros ficou em torno de 12% acima dos erros do método proposto neste artigo.
Por fim, verificou-se que o presente métodos possui erros próximos de 1% para MITs com carregamento de 100%, fato este que ocorre independente da Qualidade de Energia Elétrica fornecida aos motores.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). "Atlas de energia elétrica do Brasil" 3. ed. Brasília, 2008. 236 p.

[2] FRANCISQUINI, Aislan Antônio. "Estimação de Curvas de Carga em Pontos de Consumo e em Transformadores de Distribuição" 94 f. *Dissertação (Mestrado) - Curso de Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio De Mesquita Filho",* Ilha Solteira, Brasil, 2006.

[3] DONOLO, Pablo, PRZZANI, C. M., BONELLI, A. F., AOKI, A. R., NEHLS, R. A., BOSSIO, G. R., GARCÍA, G. O. "Performance of High Efficiency Induction Motors with Power Quality Problems" *46th The CIGRE Biennial*. Paris, França. 2014.

[4] DONOLO, Pablo, PRZZANI, C. M., BONELLI, A. F., AOKI, A. R., NEHLS, R. A., BOSSIO, G. R., GARCÍA e G. O. “Rendimiento y factores de demérito del motor de inducción con desequilibrio de tensión” *XV Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré (XV ERIAC)*. Foz de Iguaçu, Brasil. 2013.
[5] SOUTO, Olívio Carlos Nascimento. “Modelagem e análise do desempenho térmico de motores de indução sob condições não ideais de alimentação” 384 f. *Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia*, Uberlândia, 2001.
[6] ARFAT, Siddique; S., Yadava G.; SINGH, Bhim. “Effects of Voltage Unbalance on Induction Motors” *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Indianápolis, 2004.
[7] SOUTO, Olívio C. N.; OLIVEIRA, José C.; VILELA, José H.; NETO, Luciano M. “Efeitos da Qualidade da Energia Elétrica sobre a Operação de Motores de Indução Trifásicos” *VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica,* Blumenau, 2009.
[8] DE ABREU, J. Policarpo G.; DE SA, Jocélio S.; HADO, Claudio C. “Harmonic Torques in Three-phase Induction Motors Supplied by Non-Sinusoidal Voltages” *11th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 2004.
[9] MIRABBASI, Davar; SEIFOSSADAT, Ghodratollah; HEIDARI, Mehrdad. “Effect of Unbalanced Voltage on Operation of Induction Motors and Its Detection” *IEEE Transaction,* 2009.
[10] MÕLDE, H.; VINNAL, T.; BELDJAJEV, V. “Harmonic Losses in Induction Motors Caused by Voltage Waveform Distortions” *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference*, 2010.
[11] DUARTE, Silvio Xavier; KAGAN, Nelson. “A Power-Quality Index to Assess the Impact of Voltage Harmonic Distortions and Unbalance to Three-Phase Induction Motors” *IEEE Transaction On Power Delivery*, 2010.
[12] BONELLI, Arthur F.; AOKI, A. R.; TEIXEIRA, M. D.; LANGNER, A. L.; SOUZA, W. E.; FILIPINI, F. A.; NEHLS, R. A. “Panorama do Impacto da Qualidade da Energia Elétrica Aplicada aos Motores das Indústrias Estado do Paraná” *IV SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Goiânia, 2012.
[13] L. Bin, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "A survey of efficiency-estimation methods for in-service induction motors," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 42, pp. 924-933, 2006.
[14] FERREIRA, Fernado. J. T. E.; ALMEIDA, A. T. “Considerations on In-Field Induction Motor Load Estimation Methods” *Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical*, 2008.
[15] ALMEIDA, M. “Estudo de viabilidade técnica para substituição de motores elétricos a partir de proposta de método alternativo na determinação do carregamento” 98 f. *Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Eficiência Energética na Indústria*, Departamento de Eletrotécnica, UTFPR, Curitiba, Brasil, 2006.
[16] MOTOR CHALLENGE, "DOE/GO- 10097-517. FACT SHEET: The Program of the U. S. Department of Energy. “Determining Electric Motor Load and Efficiency”.
[17] A. G. Siraki, C. Gajjar, M. A. Khan, P. Barendse, and P. Pillay, "An Algorithm for Nonintrusive In Situ Efficiency Estimation of Induction Machines Operating With Unbalanced Supply Conditions" *Industry Applications, IEEE Transactions*, vol. 48, pp. 1890-1900, 2012.
[18] DIAS, Guilherme A. D. “Harmônicos em Sistemas Industriais” *Porto Alegre: Edipucrs*, 1998. 213 p.
[19] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7094 – “Máquinas Elétricas Girantes – Motores de indução – Especificação” 2003.